

О.Ю. Пазен

Львівський державний університет безпеки життєдіяльності, м. Львів

## ВЕРИФІКАЦІЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕННЯ НЕСТАЦІОНАРНОГО ТЕМПЕРАТУРНОГО ПОЛЯ В БЕТОННІЙ КОНСТРУКЦІЇ ЗА УМОВ СТАНДАРТНОГО ТЕМПЕРАТУРНОГО РЕЖИМУ ПОЖЕЖІ

Основним класифікаційним показником, із точки зору пожежної безпеки будівлі, є ступінь його вогнестійкості. Залежно від цього показника нормують його поверховість, площу забудови та відстані до інших будинків і споруд. Ступінь вогнестійкості будинку визначається межею вогнестійкості його будівельних конструкцій та межею поширення вогню цими конструкціями. Тому значення межі вогнестійкості будівельних конструкцій, із яких складається будинок, істотно впливають на його архітектурне рішення та параметри забудови в цілому. Виходячи з цього, врахування підходів до забезпечення нормованих меж вогнестійкості конструкції та особливостей їх поведінки під високотемпературним (вогневим) впливом є досить актуальним.

Більшість досліджень будівельних конструкцій базується на двох способах визначення межі вогнестійкості – експериментальному та аналітичному. Перший полягає у визначенні межі вогнестійкості на основі експериментальних досліджень, а другий базується на аналітичних або розрахунково-експериментальних методах. У більшості країн експериментальне визначення вогнестійкості будівельних конструкцій проводять за допомогою вогневих випробувань. Проте експериментальні дослідження потребують значних фінансових затрат та високої точності проведення вогневих випробувань. Альтернативою методам оцінки вогнестійкості несучих елементів будівлі на основі натурних вогневих випробувань є розрахункові методи, що застосовуються для проектування вогнестійких будівельних конструкцій.

У статті проведено верифікацію результатів аналітичних досліджень про поширення нестационарного температурного поля у бетонній конструкції за умов впливу стандартного температурного режиму пожежі у порівнянні з результатами натурних вогневих випробувань. Аналіз одержаних результатів показує, що результати розрахунку поширення нестационарного температурного поля по товщині бетонної конструкції без покриття та з нанесеним вогнезахисним покриттям «Фенікс СТВ», виробництва фірми «А+В Україна» по ґрунтовці «Фенікс Контакт», отримані за допомогою математичних моделей, є якісно і кількісно збіжними з результатами, отриманими експериментальним шляхом. Розбіжність між теоретичними та експериментальними даними для бетонної конструкції без покриття становить 4%, а з нанесеним вогнезахисним покриттям – не перевищує 10%.

**Ключові слова:** вогнестійкість, натурні вогневі випробування, прямий метод.

**Вступ.** Для пожежної безпеки на тому чи іншому об'єкті необхідно, з точки зору наукових досліджень, пізнати закономірності виникнення, розвитку пожежі та її вплив на різного роду конструкції. Щоб проаналізувати явища, які відбуваються в будівельних конструкціях під час нагрівання, необхідно використовувати методи теплофізики, математики, хімії, термодинаміки тощо. За допомогою комплексу цих дисциплін можна вивчити і описати процеси, які там відбуваються.

З плином часу задачі теорії теплопровідності ускладнюються і наступають моменти, коли математичний апарат потребує вдосконалення. Такі вдосконалення у вигляді математичних моделей реальних проблем в області теплопередачі потребують створення сучасних, а іноді й новітніх методів їх реалізації.

Досліджуючи межу вогнестійкості елементів багат шарових будівельних конструкцій отримуємо крайові задачі та їх численні узагальнення, що породжують проблему розв'язування диференці-

ального рівняння теплопровідності. Традиційні методи дослідження аналогічних задач таких рівнянь не спроможні розв'язати сучасні проблеми. В цих методах обмежується розгляд шаруватих структур (збільшення кількості шарів веде до стрімкого збільшення об'єму необхідних розрахунків). Крім цього, традиційні методи не дають можливості досліджувати температурні поля багат шарових конструкцій, які мають змінні параметри шарів (системи вогнезахисного покриття що спучуються), а також не враховуються внутрішні джерела (стоки) тепла, що є суттєвим фактором, який впливає на вогнестійкість будівельних конструкцій. У зв'язку з цим поставлено задачу зведення нових задач теплопровідності до нових моделей, що ґрунтуються на новітніх сучасних теоріях.

Основним класифікаційним показником, з точки зору пожежної безпеки, є ступінь вогнестійкості будинку. Залежно від цього показника, згідно з [1], нормують його поверховість, площу забудови та відстані до інших будинків і споруд. Ступінь вогне-

стійкості будинку визначається межею вогнестійкості його будівельних конструкцій та межею поширення вогню цими конструкціями. Тому значення межі вогнестійкості будівельних конструкцій, із яких складається будинок, істотно впливають на його архітектурне рішення та параметри забудови в цілому. Виходячи з цього, забезпечення нормованих меж вогнестійкості конструкцій та особливостей їх поведінки під високотемпературним (вогневим) впливом є досить актуальним.

На сьогодні в Україні діє низка стандартів, що регламентують методи випробувань на вогнестійкість окремих видів конструкцій [2, 3]. Більшість досліджень цих конструкцій базується на двох способах визначення межі вогнестійкості – експериментальному та аналітичному.

Перший полягає у визначенні межі вогнестійкості на основі експериментальних досліджень, а другий базується на методах аналітичних або розрахунково-експериментальних досліджень. У більшості країн експериментальне визначення вогнестійкості будівельних конструкцій проводять за допомогою вогневих випробувань. Проте експериментальні дослідження потребують значних фінансових затрат та високої точності проведення вогневих випробувань.

**Методи випробувань будівельних конструкцій на вогнестійкість.** При використанні методу натурних вогневих випробувань будівельних конструкцій на вогнестійкість використовують реальний будівельний об'єкт, який відповідає проектній документації, або його фрагмент. Сутність методу натурних вогневих випробувань полягає у визначенні проміжку часу від моменту запалювання модельного вогнища пожежі до настання одного з трьох граничних станів втрати вогнестійкості, нормованих для будівельних конструкцій [3].

Натурні вогневі випробування потребують потужних випробувальних лабораторій, які зможуть забезпечити необхідний рівень вимог, до проведення експериментальних досліджень. Цей метод потребує використання вартісного обладнання і значних трудових ресурсів.

Частковим варіантом цієї вирішенням непрості ситуації є проведення натурних випробувань моделей конструктивних систем, що є певним компромісом між дрібномасштабними випробуваннями окремих конструкцій та повномасштабними випробуваннями фрагментів будівель. Такі випробування не вирішують ситуацію комплексно, проте вони є основою для апробації чисельних методів та визначення їх адекватності до реальної роботи. На сьогодні ці експерименти є здебільшого науковими, але попри певні неточності і відмінності, викликані масштабним фактором, дають більш-менш реальні результати.

Альтернативою методам оцінки вогнестійкості несучих елементів будівлі на основі натурних вогневих випробувань є розрахункові методи, що застосовуються для проектування вогнестійких

будівельних конструкцій [2]. Розрахункові методи застосовують як феноменологічні, так і теоретичні засади, щодо поведінки конструктивних елементів в умовах термосилового впливу пожежі. При застосуванні таких методів не існує обмежень на геометрію, граничні умови та силові фактори цих елементів, які у багатьох випадках з'являються при здійсненні вогневих випробувань.

Особливістю розрахункових методів є необхідність на початковому етапі оцінювати розподіл температурного поля у початковий момент часу в поперечних перерізах конструкцій з огляду на стандартний температурний режим пожежі. У спрощених методах такий розподіл визначається за спеціальними номограмами, в уточнених методах вирішується задача теплопровідності у тій чи іншій постановці.

У запропонованій роботі проведено верифікацію результатів, отриманих за допомогою методу математичного моделювання у порівнянні з відповідними експериментальними даними щодо розподілу нестационарного температурного поля у багатошарових елементах будівельних конструкцій за умов пожежі.

**Експериментальне дослідження вогнезахисної здатності покриття «Фенікс СТВ» на бетонній плиті.** Метою експериментальних досліджень є перевірка адекватності отриманих аналітичних моделей з експериментальними дослідженнями часу настання граничної межі вогнестійкості бетонних плит, захищених та не захищених вогнезахисним покриттям, що спучується. За основу взято дані експерименту, що проводився в центрі вогневих випробувань «Тест» [4]. Метою цього експерименту було визначення вогнезахисної здатності вогнезахисного покриття, що спучується, яке було нанесено на бетонну плиту, при температурному режимі, близькому до стандартного температурного режиму [2]. Для визначення вогнезахисної здатності покриття «Фенікс СТВ» виробництва фірми «А+В Україна» нанесеного на бетонну плиту, при режимі, близькому до стандартного температурного режиму, було сплановано і проведено серію вогневих випробувань бетонних плит товщиною 60 мм. Випробуванням піддавались два зразки бетонних плит, розмірами 600х600х60 мм [4].

На поверхні, які обігріваються, зразка № 1 перед випробуванням було нанесено: вогнезахисне покриття «Фенікс СТВ» товщиною 1,5 мм; вогнезахисне покриття «Фенікс СТВ», товщиною 1,5 мм по ґрунтовці «Фенікс Контакт»; ґрунтовка «Фенікс Контакт» без покриття; а на одну чверть ґрунтовка і покриття не наносились [4].

На поверхні, що обігрівається зразка № 2 перед випробуванням було нанесено: вогнезахисне покриття «Фенікс СТВ» товщиною 1,5 мм; вогнезахисне покриття «Фенікс СТВ», товщиною 1,5 мм по ґрунтовці з рідкого скла; ґрунтовка з рідкого скла без покриття; а на одну чверть ґрунтовка і покриття не наносились [4].

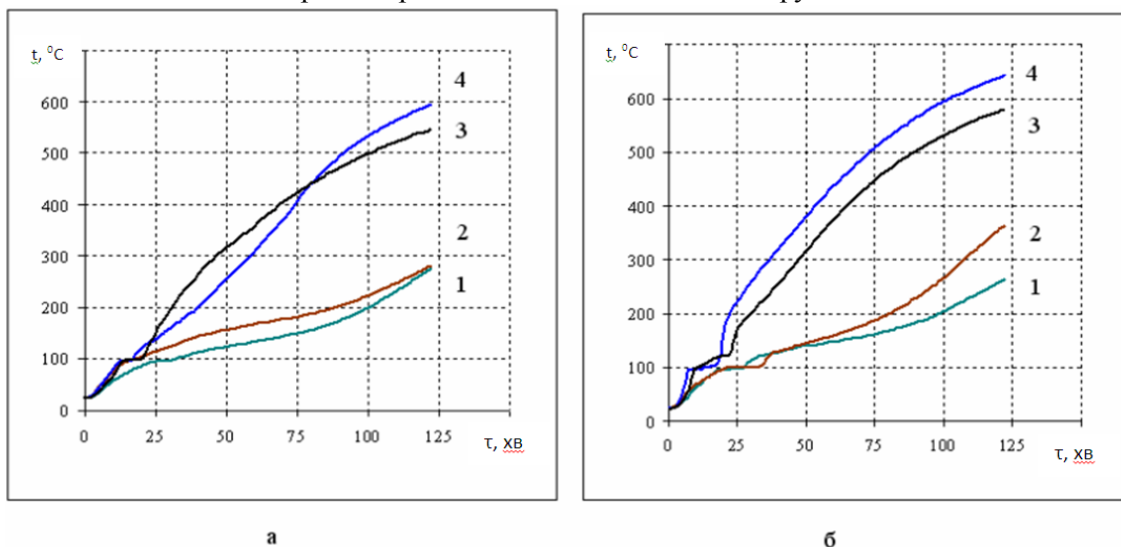
Кожен зразок препарували хромель-алюмелевими термопарами (ТХА) по центру чвертей на глибині 20 мм від поверхні, що обігрівається (очікуване місце розташування несучої арматури в залізобетонних конструкціях). Додатково на кожному зі зразків з поверхні, що не обігрівається встановлювали по дві термопари ТХА на чвертях з покриттям та ґрунтовкою і без ґрунтовки та покриття [4].

Зразки встановлювались вертикально в отворах вогневої печі. Випробовування проводилось при температурі навколишнього середовища  $25^{\circ}\text{C}$  і відносній вологості 65%. Для випробовування використовувалась спеціальна піч (атестат № 24-2/0330) і засоби вимірювальної техніки. Випробовування зразків проводилось в умовах, близьких до стандартного температурного режиму, протягом 122 хвилин. На рис. 1 представлені

графіки зміни температури від часу вогневого випробовування в чвертях поверхні, що обігрівається на глибині 20 мм [4].

**Теоретичне дослідження вогнезахисної здатності бетонної плити без вогнезахисного покриття.** Для перевірки адекватності математичної моделі порівняємо результати теоретичних та експериментальних досліджень.

Розглянемо два випадки нагрівання конструкції: 1 – бетонна конструкція; 2 – бетонна конструкція з нанесеним вогнезахисним покриттям «Фенікс СТВ», виробництва фірми «А+В Україна» по ґрунтовці «Фенікс Контакт». Необхідно визначити розподіл нестационарного температурного поля по товщині цих конструкцій за умови стандартного температурного режиму пожежі. Вихідні дані для розрахунку нестационарного температурного поля конструкцій наведено в табл. 1.



**Рисунок 1** – Графік зміни температури від часу вогневого випробовування в чвертях поверхні, що обігрівається на глибині 20 мм:

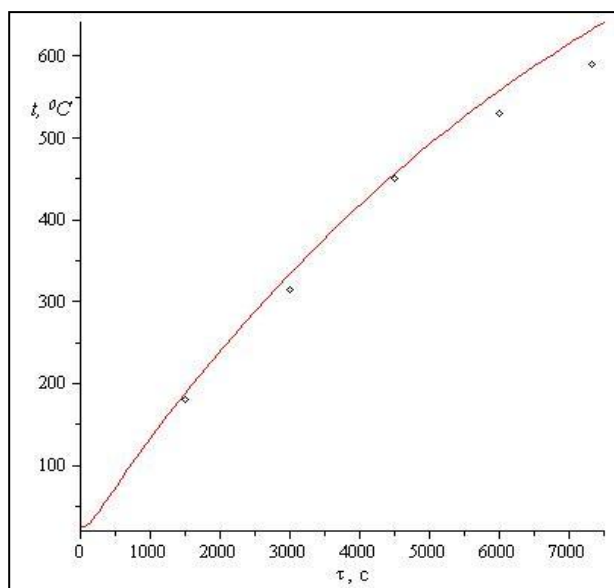
- 1 – чверть зразка, з нанесеним вогнезахисним покриттям «Фенікс СТВ»;
- 2 – чверть зразка, з нанесеним вогнезахисним покриттям «Фенікс СТВ» та ґрунтовкою «Фенікс Контакт» (а) та ґрунтовкою з рідкого скла (б);
- 3 – чверть зразка, на яку не наносилось вогнезахисне покриття та ґрунтовка; 4 – чверть зразка з нанесеною ґрунтовкою «Фенікс Контакт» (а) та ґрунтовкою з рідкого скла (б)

**Таблиця 1** – Теплофізичні характеристики матеріалів

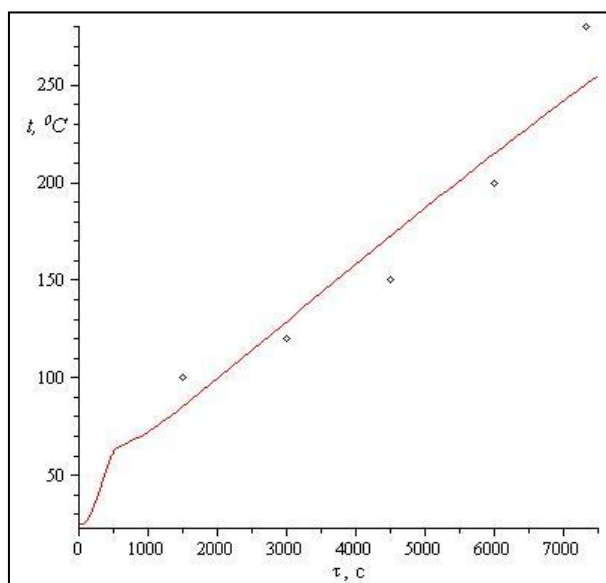
Параметр	«Фенікс СТВ»	Ґрунтовка «Фенікс Контакт»	Бетонна плита
Товщина, м	0,015 – до вспучення 0,0015 – після вспучення	0,001	0,06
Коефіцієнт теплопровідності, $\frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot ^{\circ}\text{C}}$	0,5	0,5	1,92
Питома теплоємність, $\frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot ^{\circ}\text{C}}$	1100	1100	840
Густина, $\frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$	1340	1340	2500
Початковий розподіл температури, $^{\circ}\text{C}$	25	25	25
Закони зміни температури на поверхнях, $^{\circ}\text{C}$	$\psi_0(\tau) = 345 \lg \left( 1 + \frac{8\tau}{60} \right) + 25$ , $\psi_n(\tau) = 25$		
Коефіцієнти тепловіддачі на поверхнях, $\frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot ^{\circ}\text{C}}$	$\alpha_0 = 25$ , $\alpha_n = 4$		

Для визначення температурного поля по товщині конструкції використаємо метод, який детально описано у роботах [5-10] та алгоритмізовано в комп'ютерному середовищі Maple 13 [11].

Результати аналітичного розрахунку цієї задачі отримуємо у вигляді рис. 2.



а)



б)

**Рисунок 2** – Графік зміни температури від часу вогневого випробування

а) – без вогнезахисного покриття на глибині 20 мм;

б) – з вогнезахисним покриттям «Фенікс СТВ»

(— – результати теоретичних досліджень;

◊ – результати експерименту)

На рис. 2 представлено порівняння результатів експериментального та теоретичного дослідження поширення нестационарного температурного поля по товщині бетонної конструкції без покриття та з нанесеним вогнезахисним покриттям «Фенікс СТВ», виробництва фірми «А+В Україна» по ґрунтовці «Фенікс Контакт» на глибині 20 мм.

**Висновок.** Аналіз графічних залежностей (рис. 2) показує, що результати розрахунку поширення нестационарного температурного поля по товщині бетонної конструкції без покриття та з нанесеним вогнезахисним покриттям «Фенікс СТВ», виробництва фірми «А+В Україна» по ґрунтовці «Фенікс Контакт», отримані за допомогою математичних моделей, є якісно і кількісно збіжними з результатами, отриманими експериментальним шляхом. Розбіжність між теоретичними та експериментальними даними для бетонної конструкції без покриття становить 4%, а з нанесеним вогнезахисним покриттям не перевищує 10%.

### Список літератури:

- ДБН В.1.1.7-2016. «Захист від пожежі. Пожежна безпека об'єктів будівництва».
- ДСТУ-Н Б EN 1991-1-2:2010 «Єврокод 1. Дії на конструкції. Частина 1-2. Загальні дії. Дії на конструкції під час пожежі».
- ДСТУ Б В. 1.1-4-98. «Будівельні конструкції. Методи випробувань на вогнестійкість. Загальні вимоги. Пожежна безпека».
- Ковалев А. И. Экспериментальное исследование огнезащитной способности вспучивающегося огнезащитного покрытия на бетонной плите / А. И. Ковалев, П. Г. Круковский, Е. В. Качкар, А. А. Абрамов. // Збірник наукових праць ЛДУ БЖД «Пожежна безпека». – 2010. – №17. – С.172–179.
- О. У. Pazen and R. M. Tatsii, General boundary-value problems for the heat conduction equation with piecewise-continuous coefficients, Journal of Engineering Physics and Thermophysics, vol. 89, no. 2, pp. 357-368, March 2016. DOI:<https://doi.org/10.1007/s10891-016-1386-8>.
- Тацій Р. М. Прямий метод розрахунку нестационарного температурного поля за умов пожежі / Р. М. Тацій, О. Ю. Пазен // Пожежна безпека : Зб. наук. пр. – Львів : ЛДУ БЖД, 2015. – № 26. – С. 135-141.
- Тацій Р. М. Загальна третя крайова задача для рівняння теплопровідності з кусковосталими коефіцієнтами та внутрішніми джерелами тепла / Р. М. Тацій, Т. І. Ушак, О. Ю. Пазен // Пожежна безпека: Зб. наук. пр. – Львів : ЛДУ БЖД, 2015. – № 27. – С. 120-126.
- R. M. Taciý, O. Yu. Pazen "Calculation of a Stationary Temperature Field in a Multi-Layered Panel with due regard to Internal Heat Sources Containing Non-Ideal Thermal Links Between Layers" Bezpieczeństwo i Technika Pożarnicza, 4, pp. 51-59. 2015. DOI:10.12845/bitp.40.4.2015.4.
- Тацій Р.М. Визначення теплообміну в багатошаровій нескінченній плиті з дискретно-неперервним розподілом тепла / Тацій Р.М., Кусій М.І., Пазен О.Ю. // Пожежна безпека. Зб.наук.пр. ЛДУБЖД. – 2012. – №20. – С.20-26.

10. Семерак М. М. Теплоизолирующая способность многослойных строительных конструкций с учётом разрушения произвольного слоя / М. М. Семерак, Р. М. Таций, О. Ю. Пазен // Вестник Кокшетауского технического института Министерства по чрезвычайным ситуациям республики Казахстан : Сб. науч. тр. – Кокшетау : КТИ КЧС МВД РК, 2015. – № 4 (20). – С. 8–17

11. O. Y. Pazen "Mathematical modelling and computer simulation of direct method for studying boundary value problem of thermal conductivity" Problems of Infocommunications. Science and Technology, pp. 73-76. 2017. DOI:10.1109/INFOCOMMST.2017.8246353.

### Reference:

1. DBN V.1.1.7-2016. «Zakhyst vid pozhezhi. Pozhezhna bezpeka obyektiv budivnytstva [Fire protection. Fire safety of construction objects]».

2. DSTU-N B EN 1991-1-2:2010 «Yevrokod 1. Diyi na konstrukttsiyi. Chastyna 1-2. Zahalni diyi. Diyi na konstrukttsiyi pid chas pozhhezhi [Actions on structures – Part 1-2: General actions – Actions on structures exposed to fire]»

3. DSTU B V. 1.1-4-98. «Budivelni konstrukttsiyi. Metody vyprobuvan na vohnestiykist. Zahalni vymohy. Pozhezhna bezpeka [Building constructions. Test methods for fire resistance. General requirements. Fire Security]».

4. Kovalev A. I. Eksperimental'noye issledovaniye ognezashchitnoy sposobnosti vspuchivayushchegosya ognezashchitnogo pokrytiya na betonnoy plite [Experimental study of the flame retardant ability of intumescent fire retardant coating on a concrete slab] / A. I. Kovalev, P. G. Krukovskiy, Ye. V. Kachkar, A. A. Abramov. // Zbirnik naukovikh prats' LDU BZHD «Pozhezhna bezpeka». – 2010. – №17. – S.172–179.

5. O. Y. Pazen and R. M. Tatsii, General boundary-value problems for the heat conduction equation with piecewise-continuous coefficients, Journal of Engineering Physics and Thermophysics, vol. 89, no. 2, pp. 357-368, March 2016. DOI:<https://doi.org/10.1007/s10891-016-1386-8>.

6. Tatsiy R. M. Pryamyy metod rozrakhunku nestatsionarnoho temperaturnoho polya za umov pozhhezhi [Direct method of calculation unsteady temperature field in a fire] / R. M. Tatsiy, O. Yu. Pazen // Pozhezhna bezpeka : Zb. nauk. pr. – Lviv : LDU BZHD, 2015. – № 26. – S. 135-141.

7. Tatsiy R. M. Zahalna tretya krayova zadacha dlya rivnyannya teploprovodnosti z kuskovo-stalymy koefitsiyentamy ta vnutrishnimy dzherelamy tepla [General third boundary value problem for the heat equation with piecewise constant coefficients and internal heat sources] / R. M. Tatsiy, T. I. Ushak, O. Yu. Pazen // Pozhezhna bezpeka: Zb. nauk. pr. – Lviv : LDU BZHD, 2015. – № 27. – S. 120-126.

8. R. M. Tacyi, O. Yu. Pazen " Calculation of a Stationary Temperature Field in a Multi-Layered Panel with due regard to Internal Heat Sources Containing Non-Ideal Thermal Links Between Layers" Bezpieczeństwo i Technika Pożarnicza, 4, pp. 51-59. 2015. DOI:10.12845/bitp.40.4.2015.4.

9. Tatsiy R. M. Vyznachennya teploobminu v bahatosharoviy neskinchennyi plyti z dyskretno-neperervnym rozpodilom dzherel tepla [Determination of heat transfer in a multilayer endless plate with discrete-continuous distribution of heat sources] / R. M. Tatsiy, M. I. Kusi, O. Yu. Pazen // Pozhezhna bezpeka : Zb. nauk. pr. – Lviv : LDU BZHD, 2012. – № 20. – S. 20-26.

10. Semerak M. M. Teploizoliruyushchaya sposobnost' mnogoslonykh stroitel'nykh konstrukttsiy s uchëtom razrusheniya proizvol'nogo sloya [Thermal insulation ability of multilayer building structures with allowance for the destruction of an arbitrary layer] / M. M. Semerak, R. M. Tatsiy, O. Yu. Pazen // Vestnik Kokshetauskogo tekhnicheskogo instituta Ministerstva po chrezvychaynym situatsiyam respubliki Kazakhstan: Sb. nauch. tr. – Kokshetau: KTI KCHS MVD RK 4 (2015): 20. – S.8-17.

11. O. Y. Pazen "Mathematical modelling and computer simulation of direct method for studying boundary value problem of thermal conductivity" Problems of Infocommunications. Science and Technology, pp. 73-76. 2017. DOI:10.1109/INFOCOMMST.2017.8246353.

## **VERIFICATION RESULTS OF THE PRESENTATION OF THE PROTECTION OF THE UNSTEADY TEMPERATURE FIELD AT THE CONCRETE CONSTRUCTION FOR THE MIND OF THE STANDARD TEMPERATURE REFRIGERATION FIRE**

The main classification indicator, in terms of fire safety, is the degree of fire resistance of the house. Depending on this indicator normalize its surface, the area of development and distance to other buildings and structures. The degree of fire resistance of the house is determined by the limit of fire resistance of its building structures and the limit of the fire spread by these structures. Therefore, the value of the fire resistance limit of building constructions, which consists of a house, significantly affect its architectural solution and the parameters of construction in general. On this basis, taking into account the approaches to ensuring normalized fire resistance limits of the design and the features of their behavior under high-temperature (fire) influence is very relevant.

Most research on building constructions is based on two methods of determining the limit of fire resistance - experimental and analytical. The first one is to determine the limit of fire resistance on the basis of experimental research, and the second one is based on methods of analytical or computational and experimental research. In most countries, the experimental determination of fire resistance of building structures is carried out by means of fire tests. However, experimental studies require significant financial costs and high accuracy of fire tests. The alternative methods for assessing the fire resistance of building elements on the basis of field fire tests are the design methods used for the design of fire-resistant building constructions.

In the article, the verification of the results of analytical studies on the propagation of the non-stationary temperature field in the concrete structure under the conditions of the influence of the standard temperature regime of the fire in comparison with the results of field fire tests has been carried out. The analysis of the obtained results shows that the results of the calculation of the distribution of the non-stationary temperature field in the thickness of the concrete structure without coating and with the applied flame retardant coating of the Phoenix STV, manufactured by the company "A + B Ukraine" on the front of the Phoenix Contact, obtained using mathematical models, are qualitatively and quantitatively convergent with results obtained experimentally. The difference between the theoretical and experimental data for a concrete structure without coating is 4%, and with the applied fire-retardant coating does not exceed 10%.

**Key words:** fire resistance, natural fire tests, direct method.